

基于 X-Y 数控平台的边条控制系统正弦运动研究

Study on Sine Motion of Leading Edge Controlling System Based on CNC X-Y Table

中航工业空气动力研究院 明 强 张 伟 多 勤 刘国政

[摘要] 风洞试验中,对模型两侧前沿边条的控制是动态试验一个新的预研方向,在控制系统上做为特种试验研究也是一个全新的方向。本文架构了一套基于 X-Y 数控平台的边条控制系统,利用数控技术圆弧插补原理对边条正弦往复运动进行控制。通过仿真调试,对系统控制参数进行了修正,减小了跟随误差,使边条实际运动轨迹最大限度逼近指令轨迹;通过风洞试验应用验证了这套系统的可行性与高精度。

关键词: X-Y 数控平台 伺服系统 边条 跟随误差

[ABSTRACT] In wind-tunnel test, it is a new trend to control the leading edge of aircraft model for dynamic test, and also for special experimental research. Based on the principle of the CNC servo for X-Y table circular interpolation, a new leading edge controlling system is proposed. The control parameter of the system is modified after simulation and analysis, so that the error is reduced and the practical motion trajectory of leading edge maximumly approaches the instruction trajectory. The result of wind tunnel test shows that this system is feasible and has high accuracy.

Keywords: CNC X-Y table Servo system Leading edge Tracing error

在研究先进战斗机时,对其边条的研究可获得大迎角气动特性影响机理等很多重要数据,对研究我国先进战斗机布局具有潜在的促进作用和应用前景。国内在边条翼布局方面有相关研究报导,但在可控边条特性上的研究还没有先例,对动态边条试验的控制方法、控制精度也没有相关研究资料。要实现可控边条运动,需要考虑到风洞试验中模型直径较小,受控边条尺寸只有厘米量级。这就对伺服电机有着很高的要求,既要适合模型内部空间尺寸又要保证控制精度。而要得到可控边条运动影响飞行器气动特性的预研数据,就需要架构一套高精度的边条伺服控制系统^[1]。

近年来,数控平台技术已趋于成熟稳定,有着很高的控制精度,能够实现复杂的运动轨迹。X-Y 工作台作

为一种平面定位系统,控制方法也已经趋于成熟,并且其系统架构的灵活性可以对小系统微动机构进行高精度控制。考虑上述特点,将 X-Y 数控平台插补理论引入对模型边条运动轨迹进行精确控制,这在动态风洞试验中是一种尝试。摩擦是设计高精度伺服系统时必须考虑的重要因素之一,会引起系统跟随误差、极限环及低速爬行。由于非线性特性普遍存在于包括 X-Y 工作台在内的系统中,影响了控制精度,因此引入 X-Y 数控平台插补理论需要解决的技术难题就是如何减少跟随误差,使边条真实运动轨迹逼近指令轨迹,这是衡量系统精度的关键。以下将通过系统架构、仿真及风洞试验应用来验证 X-Y 数控平台伺服系统引入边条控制系统的可行性^[2]。

1 控制系统设计

在对边条姿态进行预研的风洞实验中,采用的模型边条为 120mm × 40mm,内部伺服电机要求直径在 $\phi 10\text{mm}$ 以内。边条运动过程中,能在 $\pm 30^\circ$ 范围内有不同姿态的变化,误差小于 1% 以内。设计上首先考虑边条能够实现在此范围内以频率 4Hz 的正弦往复运动,再以此为基础逐步扩展其他复杂运动规律。系统基于 X-Y 平台控制的圆弧插补原理,利用圆弧插补原理控制电机运动在 X 或 Y 轴上运动,通过向电机发送不同频率脉冲信号来改变电机运动频率,达到改变运动规律的目的。针对运动规律进行插补计算,对跟随误差进行修正,使系统精度大幅提高,一定程度上弥补了边条机械结构上的误差。

根据以上设计要求,系统选用的多轴控制卡为 PMAC-104 卡,可以实现模型两侧边条双轴同步、异步控制,并能实现运动规律程序的二次开发;伺服电机选用 MAXON256101 及配套控制器,电机直径 $\phi 10\text{mm}$,输出功率 962mW,连续转矩 1.55mN · m。采集系统选用 PXI1713 数字采集卡,通过 LabView 软件进行控制采集^[3]。

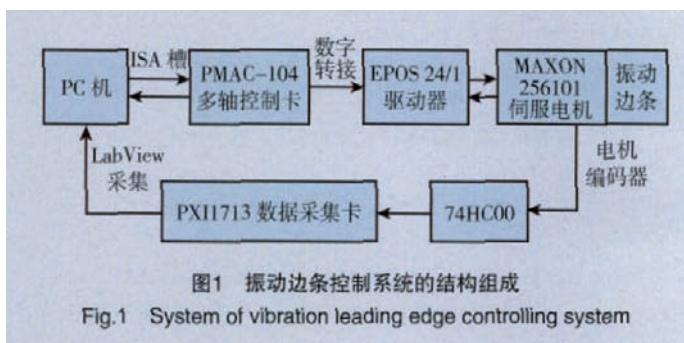
2 控制系统组成

振动边条控制系统由主控计算机、多轴控制卡、数据采集卡、电机驱动器与伺服电机组成。其中多轴控制

卡通过 ISA 槽连接计算机,经数字转接口连接电机驱动器,再连接模型内部的伺服电机,通过电机连接轴带动边条运动,反馈信号经 74HC00 电路接入到 PXI1713 数据采集卡,由 LabView 软件进行数据采集分析。

控制系统通信为双闭环结构。其中第一是计算机、控制卡构成与驱动器的控制闭环,由计算机向控制卡再向驱动器发送指令同时能够实时接收到相应的反馈信息,保证运动规律的可靠性。第二是计算机、电机编码器、数据采集卡构成位置脉冲闭环,由计算机实时发送查询指令并通过数据采集卡得到电机编码器的位置反馈脉冲,确保电机走位的精度。图 1 为振动边条控制系统的结构组成。

软件控制方面采用汇编语言命令,避免了 Windows



系统自身带来的延迟,保证了电机运动规律的可靠性;电机反馈信号由编码器直接引入采集卡,保证了采集的实时性;通信过程均为数字通信,避免了风洞试验中带来的外部干扰。

3 振动边条控制系统实现

控制系统由软件控制其运动规律。控制上基于X-Y数控平台伺服系统中的圆弧插补原理,通过插补周期计算给定坐标位置增量值,由小段直线运动逼近圆弧运动。也就是定义边条控制电机在X-Y平面的X或Y轴上运动,因为在X-Y平面内,X、Y的叠加运动轨迹为圆弧运动,所以在一个轴上切线上电机的运动轨迹为正弦运动^[4]。

3.1 系统仿真

由X-Y数控平台伺服系统控制方式对信号参数进行设置,能够使边条指令信号与实际信号尽可能接近,减小跟随误差,达到PID调节的目的,在控制上需要通过调节比例增益、微分增益、积分增益、速度前馈增益及加速度前馈增益来实现。其中比例增益来提供系统的硬度;微分增益提供稳定需要的阻尼;积分增益消除稳态误差;速度前馈增益减小由阻尼(与速度成正比)引入的跟随误差;加速度前馈增益减小或消除由于系统惯性(与加速度成正比)带来的跟随误差。表1为调节后

表1 控制参数表^[5]

名称	符号	数值
比例增益	K_p	435
微分增益	K_d	0
速度前馈增益	K_v	5 264
积分增益	K_i	0
加速度前馈增益	K_a	24 000
输出命令DAC限制		20 480

的参数表。

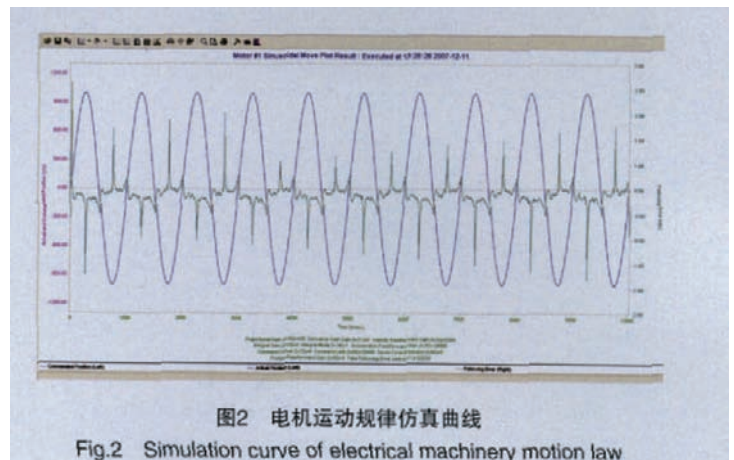
再由边条宽40mm,最大角位移30°,频率4Hz。由公式 $f=VT$ 算出插补周期 $T=22\text{ms}$,脉冲当量为22000bit/s。

通过调节以上参数控制输出的跟随误差算法:

$$\text{DACout}(n) = 2^{-19} \times K_p \times \{ [FE(n) + (K_v \times CV(n) + K_a \times CA(n)) / 128 + K_i \times IE(n) / 223] - K_d \times AV(n) / 128 \}$$

式中,DACout(n)为16位的伺服周期输出命令; K_p , K_v , K_a , K_i , K_d 为PID参数,分别为比例增益、速度前馈增益、加速度前馈增益、积分增益、微分增益; $FE(n)$ 为伺服周期n内的跟随误差,命令位置与实际位置的差值 $[CP(n)-AP(n)]$; $AV(n)$ 为伺服周期n内的实际速度,伺服周期最后两个实际位置的差值 $[AP(n)-AP(n-1)]$; $CV(n)$ 为伺服周期n内的指令速度,伺服周期最后2个指令位置的差值 $[CP(n)-CP(n-1)]$; $CA(n)$ 为伺服周期n内的的指令加速度,伺服周期最后2个指令速度的差值 $[CV(n)-CV(n-1)]$; $IE(n)$ 为伺服周期n内的的跟随误差的积分,大小为 $\sum[FE(j)]$ 。

经过系统仿真验证,将参数带入上述公式可以反推出跟随误差 $FE(n)$ 为2‰,也就是现有控制系统所能达到的最小跟随误差。通过系统仿真可以得到在10个周期($n=10$)电机运动规律及跟随误差曲线,如图2所示。图2左边纵坐标为运动脉冲振幅(蓝色曲线),右边纵坐标为跟随误差脉冲振幅(绿色曲线)。可以看到在每个周期内都有2‰的脉冲误差,但没有累计脉冲误差,系

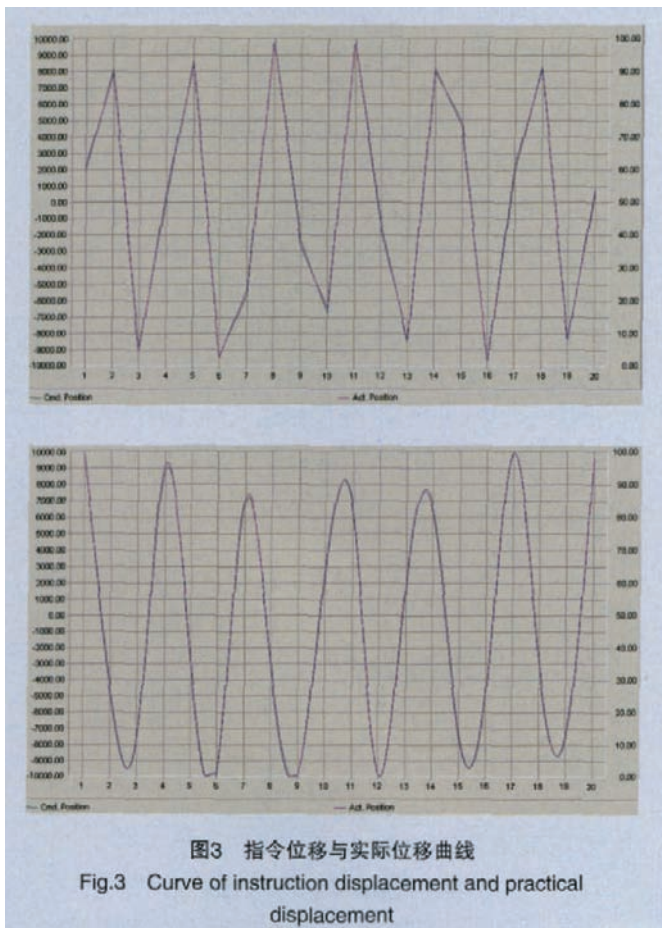


统运动基本趋近于正弦。2%的误差满足预研试验所要求达到的试验精度。

3.2 边条运动分析及风洞试验应用

通过系统仿真可以得到一个基本逼近指令轨迹的电机运动规律,但实际中还要考虑伺服电机所能达到的运动极限及机械结构配合的精密程度。通过对电机电流、环位置环及速度环的调试和参数匹配,可以使电机与机械结构达到最好的配合(这里对电机调试过程不加介绍)^[6]。图3为跟随误差调节前后指令位移与实际位移在6个周期内的曲线。在进行跟随误差修正前后,实际位移和指令位移基本吻合,运动曲线的平滑度有了很大程度的改善,运动规律基本趋于正弦运动。但在每个周期的最大位移上还有误差,电机在没有达到最大位移后开始反转,最大误差达到20%,也就是在 $\pm 30^\circ$ 的正弦运动中,最小振幅仅为 24° ,说明伺服电机转矩精度与理论要求还有差距,电机设备在4Hz的周期内达不到理论运动轨迹,经过调节运动周期降致3.2Hz,电机运动轨迹达到稳定,与理论值一致。

在对振动边条控制系统进行理论仿真,对跟随误差进行修正和实际检测后,将频率3.2Hz正弦运动应用到风洞试验中。现该系统已经完成了一期风洞试验,精度达到风洞试验要求。



96 航空制造技术 • 2010 年第 13 期

4 结束语

本文将 X-Y 数控平台圆弧插补理论的控制机理应用在风洞试验控制中,基于此原理构建了一套模型前沿边条控制系统,实现了边条正弦运动的控制。通过跟随误差修正使电机实际运动位移与指令位移相一致,使边条运动规律最大限度逼近理论正弦值。该系统已成功地完成了一次试验,得到了良好的试验效果,证明了这项技术可以满足风洞试验要求达到的控制精度。

参考文献

- [1] 李劲杰,杨青,肖春生,等. 边条翼布局流场及其双垂尾抖振特性研究. 航空学报,2006,27(3):395-398.
- [2] 阎勤劳,张海伟. X-Y 数控工作台伺服系统的整定与建模. 机械设计与制造,2008(2):144-146.
- [3] 罗学科. 典型数控系统及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2005,8.
- [4] 张春良. 基于时间分割法的 DDA 圆弧插补算法的改进. 机械工艺师,2000(5):28-29.
- [5] PMAC/PMAC2 SOFTWARE REFERENCE MANUAL www.deltatau.com 2003.05.
- [6] EPOS Application Note Position Regulation with Feed Forward. www.maxonmotor.com. 2006.06.

(责编 侧卫)

(上接第 93 页)

4 结束语

该系统向用户提供型架设计、制造、安装中所需要的数字化标准工装,包括基于参数化的数字标工三维模型、尺寸及公差等参数。通过该系统与 CATIA 的接口,用户可以将包含大量数据信息的数字标工三维模型导入到 CATIA 中,为工装设计及制造人员提供设计、制造工装的协调依据。

参考文献

- [1] 刘志存,孟颀,范玉青. 飞机制造中的数字化标准工装的定义与应用. 计算机集成制造系统,2007,9.
- [2] 胡挺,吴立军. CATIA 二次开发技术基础. 浙大旭日科技 2006.7
- [3] 林振明. 型架数字化安装工艺技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [4] 孙凤栋. Oracle 数据库基础教程. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [5] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [6] MCGAHEYJ, SCHAUTJA, CHALUPAJE, et al. An investigation into the use of small, flexible, machine tools to support the lean manufacturing environment. Warrendale, Pa., USA: Society of Automotive Engineers, 2001.

(责编 小颖)